

Modelo de Bresler y Dasberg para la infiltración de goteo

Bresler and Dasberg Model to drip Infiltration

José Miguel Cepeda Rendón¹

Ingeniero agrícola, magíster en Ciencias Agrarias
Docente tiempo completo, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales

Fecha de recepción: marzo 4 de 2008

Fecha de aceptación: mayo 30 de 2008

RESUMEN

Para determinar los diámetros húmedos producidos por el riego por goteo, se realizaron ensayos de infiltración con el método de goteo en tres suelos de la Sabana de Bogotá escogidos al azar. Los registros obtenidos se sometieron al análisis con el modelo de Bresler y Dasberg específico para goteo. El valor del diámetro húmedo, en función del caudal para el suelo franco, está entre 0,7 y 0,9 $(q)^{0.5}$ y, para el suelo franco limo arcilloso, entre 0,8 y 0,9 $(q)^{0.5}$.

PALABRAS CLAVES: infiltración, goteo.

SUMMARY

Drip infiltration method was used to determine wet diameter. The assays were conducted on three randomized soils, located on the Sabana de Bogotá. Data from infiltration assays were analyzed according with infiltration data from drip method. Wet diameter values like a drip discharge function for the free soils used in the assay were: 0.6-0.9 $q^{0.5}$, 0.7 - 0, 9 $q^{0.5}$ and 0, 8 - 0.9 $q^{0.5}$ for loam, clay silt loam and clay loam textured soils, respectively.

KEY WORDS: infiltration, drip.

¹ Enviar correspondencia a José Miguel Cepeda Rendón, Avenida Circunvalar Venado de oro, tel. 0571-3376981, jcepeda@udistrital.edu.co

INTRODUCCIÓN

La distribución del agua en los suelos irrigados por goteo determina los límites de la zona de raíces y la concentración del agua y las sales. Por tanto, su conocimiento es esencial para ajustar el ancho y la profundidad de la región de humedecimiento del sistema de raíces del cultivo en crecimiento. En consecuencia, la zona de raíces bajo goteo está restringida al relativamente pequeño volumen de suelo humedecido por el goteo. Esta región se incrementa a medida que el agua se propaga desde el gotero y es menor si el movimiento lateral del agua es reducido, produciendo diferencias significativas en: el tipo de flujo, el manejo agrotécnico del cultivo, la tasa de evaporación, la selección de la descarga del gotero, el número de goteros por planta, su disposición en el campo y la distancia entre ellos. El área humedecida por un gotero está determinada por las propiedades físicas del suelo, el caudal del gotero y la cantidad de agua aplicada, por tanto la distribución del agua producida en el riego por goteo es importante para diseñar el sistema de irrigación.

A diferencia de los métodos tradicionalmente usados para medir la infiltración en los cuales se produce un flujo unidimensional, en la infiltración de goteo se origina un flujo transitorio de tipo axisimétrico radial en dos dimensiones, donde la descripción matemática del movimiento del agua en el suelo se vuelve más compleja y de difícil solución.

Con el fin de establecer los valores de los diámetros húmedos producidos por el goteo en distintos suelos y los procedimientos más apropiados para la ejecución del ensayo se realizó el presente estudio. Los ensayos se realizaron con el procedimiento recomendado por Bresler y Dasberg, autores del modelo específico para el análisis de la infiltración de goteo, al cual se le introdujo, como modificación a la botella de Mariotte, el uso de una fumigadora convenientemente adaptada y dotada de un regulador de presión. Esta modificación al procedimiento permite disponer

de una fuente autónoma de energía para suministrar la presión requerida por los emisores, los que, acoplados a una manguera, constituyen los tratamientos (caudales) de goteo. Esta disposición de los tratamientos constituyó un bloque en el análisis estadístico.

I. REVISIÓN DE LITERATURA

Hidrológicamente, el proceso de infiltración separa la lluvia en dos partes: una almacenada dentro del suelo, que suministra el agua a las raíces de la vegetación y recarga el agua del subsuelo; la otra parte no penetra la superficie y origina la escorrentía superficial. Por esta razón, la infiltración se constituye en un punto importante dentro del ciclo hidrológico (Nielsen, 1994).

En 1947, la Sociedad Americana de la Ciencia del suelo definió la infiltración como la entrada vertical del agua en el suelo a través de la superficie, la cual puede ser plana o convexa y puede estar conformada por las paredes de poros por formas definidas (esferas, cilindros). La fuente de agua puede cubrir total o parcialmente la superficie. A causa de la infiltración el suelo, llega a humedecerse con el tiempo; si la infiltración es vertical, en el borde de humedecimiento, el agua avanza dentro de la región de suelo seco bajo la influencia de los gradientes de potencial mátrico y de potencial gravitacional.

Durante los primeros estados de infiltración, el frente de humedecimiento está cerca de la superficie del suelo y el gradiente de potencial mátrico predomina sobre la fuerza gravitacional. A la velocidad de flujo de agua a través de la superficie topográfica del suelo se le denomina tasa de infiltración.

Las ecuaciones que describen la infiltración consideran el flujo de agua en una dimensión, tanto en la dirección vertical, como en la horizontal. La teoría matemática de la infiltración vertical está basada en la ecuación de Richard, con solución encontrada por Philip (1969).

1.1 Infiltración en dos y tres dimensiones

En 1968, Philip estudió en detalle la Infiltración a partir de una cavidad semiesférica y de un surco semicircular lleno de agua, usando soluciones para la ecuación de transporte. Encontró que, en los dos casos la tasa de infiltración es, inicialmente, muy alta, y disminuye hasta aproximarse a una tasa constante, la cual, si las dimensiones de la cavidad o el surco son específicas y se conoce la conductividad hidráulica del suelo, puede ser estimada. Talsma, en 1969, usando el tratamiento sugerido por Philip, comprobó una buena correlación entre las mediciones de campo y la tasa de infiltración predichas.

La forma del frente de humedecimiento que se origina bajo una fuente localizada de agua (que puede ser un surco o un repesamiento) depende, en gran parte, de cuál es la fuerza que predomina en el suelo. Si predominan las fuerzas mátricas, el frente de humedecimiento tiende a ser simétrico y se mueve la misma cantidad, tanto horizontal como verticalmente. Si la fuerza que predomina es la gravedad (como en el caso de muchos suelos de textura arenosa), el frente de humedecimiento tiende a tener una forma alargada y se aproxima a un elipsoide. Estos dos prototipos de la forma constituyen algunas de las diferencias fundamentales entre la infiltración en una dimensión y la infiltración en tres dimensiones.

Wooding (1969) derivó la expresión (1) aproximada para la tasa de infiltración constante a partir de un depósito circular de radio r_0 colocado sobre un suelo, cuya función de conductividad hidráulica se asumió como:

$$K(h) = K_s e^{\alpha h} \quad (1)$$

Donde: h = tensión

K_s y α son constantes y representan propiedades del suelo.

Como $K = K_s$, cuando $h = 0$, K_s representa la conductividad hidráulica saturada a partir

de la cual Wooding propuso la ecuación (2) de flujo para la infiltración constante:

$$I_f = K_0 \left(1 + \frac{4}{\pi \alpha r_0^2} \right) \quad (2)$$

Contrario al flujo en una dimensión, la tasa final excede el valor de la conductividad hidráulica saturada, porque el agua puede entrar y moverse lateral y verticalmente.

1.2 Infiltración para goteo

Brandt, en 1971, desarrolló las consideraciones teóricas y las herramientas matemáticas para analizar la infiltración multidimensional transitoria que se produce a partir de un emisor de goteo. Para realizar el análisis, Brandt supuso el suelo como un medio poroso, estable, isotrópico y homogéneo. Con este marco, aplicó la ley de Darcy, tanto a las zonas saturadas, como a las insaturadas; además, tomó en cuenta el hecho de que la infiltración involucra sólo el humedecimiento, por lo cual el contenido de agua en cualquier punto del sistema no disminuye con el tiempo durante la infiltración.

Con estas consideraciones, tanto la sorbicidad como la conductividad hidráulica del suelo tienen valores únicos y son funciones continuas del contenido de agua del suelo θ . Bajo estas condiciones, la ecuación diferencial que gobierna el flujo de agua en tres dimensiones, escrita como un modelo de flujo cilíndrico descrito por las coordenadas r y z , donde r corresponde a la dimensión radial, z a la distancia vertical y h a la presión del agua en el suelo, en función de la conductividad hidráulica $K(\theta)$ queda:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial r} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + K \frac{\theta}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad (3)$$

La solución de esta ecuación tiene importancia, pues en ella están integradas las propiedades del suelo y la descarga del goteo y, teniendo en cuenta el valor de $K(h)$ de la ecuación de flujo 1, se tiene:

$$q_0 = \frac{Q}{\pi r^2} = K_s + \frac{4}{\pi} \frac{1}{r} F \quad (4)$$

Donde a es un parámetro del suelo con unidades cm^{-1} , ya mencionado atrás como $K(h) = K_s \theta^{ah}$, q_0 , la densidad de flujo, K_s la conductividad hidráulica saturada, r el radio de la zona inundada (charco) en la superficie, Q la descarga del gotero y F es una función de flujo mátrico que esta definida por:

$$F = K(h)dh = D(\theta)d\theta \quad (5)$$

Y que al resolver, se obtiene el valor de F :

$$F = \frac{K_s}{\alpha} \quad (6)$$

Y, al reemplazar este valor de F en (4):

$$q_0 = \frac{q_{got}}{\pi r^2} = K_s + \frac{4}{\pi} \frac{1}{r} \frac{K_s}{\alpha} \quad (7)$$

Agrupando variables y simplificando:

$$Q_0 = K_s \pi r^2 + \frac{4 K_s}{\alpha r} - q = 0 \quad (8)$$

Que es una ecuación cuadrática en r , con solución para el radio final:

$$r_f = \frac{-2}{\alpha \pi} + \left(\frac{4}{(\alpha \pi)^2} + 1000 \frac{Q}{\pi K_s} \right)^{1/2} \quad (9)$$

Esta ecuación de flujo es de tipo lineal y expresa la relación $i = Q/A$ entre el flujo por unidad de área del emisor (gotero) en la zona de inundación en función de $1/r$. El valor de K_s corresponde al intercepto de la recta con la ordenada. El valor de a es un parámetro del suelo cm^{-1} .

1.3 Predicción de la zona de inundación a partir del modelo de Bresler y Dasberg

Los valores de predicción del diámetro de la zona de inundación (charco) se obtienen a partir de la solución del modelo cuadrático

en r propuesto por Bresler y Dasberg de la siguiente forma:

$$i = K_s + b \frac{1}{r} \quad (10)$$

Donde: i = velocidad de infiltración
 K_s = conductividad hidráulica saturada
 b = pendiente de la línea de regresión
 r = radio de la zona inundada

Aquí:

$$b = \frac{4}{\pi} \frac{K_s}{\alpha} \quad (11) \quad i = \frac{q}{\pi r^2} \quad (12)$$

a = parámetro del suelo cm^{-1}

Reemplazando i, q :

$$\frac{q}{\pi r^2} = K_s + \frac{4}{\pi} \frac{K_s}{\alpha} \frac{1}{r} \text{ de donde}$$

$$K_s r^2 + \frac{4 K_s}{\alpha \pi} r - q = 0, \text{ con solución:}$$

$$r_f = \frac{-2}{\alpha \pi} + \left(\frac{4}{(\alpha \pi)^2} + 1000 \frac{Q}{\pi K_s} \right)^{1/2} \quad (13)$$

Donde: K_s = conductividad hidráulica saturada

Q = caudal del gotero que se va a utilizar

a = parámetro del suelo, cm^{-1}

r_f = radio final de la zona de inundación (charco), a partir del cual la zona de encharcamiento no presenta crecimiento

El diámetro del frente de humedecimiento se puede predecir a partir de la relación que, generalmente se cumple:

$$\frac{\phi_{charco}}{\phi_{frente húmedo}} = \frac{1}{2.5} \quad (14)$$

1.4 Determinación de la infiltración en campo

El método relativamente más reciente, descrito por Bresler, para medir la infiltración corresponde al riego por goteo y consiste en aplicar el agua de infiltración al suelo desde

una fuente puntual (emisor). La velocidad con que el agua se infiltra está dada por:

$$q = \frac{Q}{A} \quad (15)$$

Donde: q = tasa de infiltración

Q = caudal del gotero

A = área de la entrada del agua al suelo

Como, al comienzo de la infiltración, el área por la cual el agua entra al suelo es muy pequeña (el área por donde entra una gota), $A \rightarrow 0$ y la tasa de infiltración es muy grande, por lo cual generalmente, la descarga del gotero excede la capacidad de infiltración del suelo que está bajo él y en consecuencia, se desarrolla una zona de inundación (charco) alrededor del gotero, el tamaño del charco de agua aumenta con el tiempo. En este ensayo, la tasa de infiltración θ_s también, es decreciente con el tiempo y depende del área del charco, por lo cual su registro se hace necesario para tiempos diferentes.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para efectuar los distintos ensayos se escogieron al azar tres suelos diferentes, con la condición de que contaran con una cubierta permanente, de tal manera que los contenidos de humedad del suelo bajo estudio no fueran alterados por la precipitación y el viento y así disponer de humedades diferentes, relativamente controladas al realizar cada ensayo.

Los suelos estudiados están todos ubicados en la Sabana de Bogotá, cuya localización geográfica corresponde a la latitud 4°04'N y longitud 74°06'W, con una altura de 2600 m. sobre el nivel del mar, una temperatura promedio de 13,2°C y una precipitación pluvial promedio de 713 mm al año.

2.1 Parcela experimental

El estudio se realizó con el fin de determinar el diámetro húmedo producido por la infiltración de goteo en los suelos tratados con tres

caudales distintos. Para la aplicación de los tratamientos de infiltración de goteo (caudal de los goteros), se colocaron tres emisores (goteros) del tipo autocompensado con caudales nominales de dos, cuatro y ocho litros por hora cada uno, sobre una manguera de doce milímetros de diámetro y tres metros de longitud, separados un metro el uno del otro, con el fin de evitar traslapos entre los diámetros húmedos producidos por la infiltración. El ensayo así dispuesto constituye un bloque de tratamientos y ocupó una longitud de cuatro metros. Con esta disposición de los bloques, se determinó que el área ocupada por cada parcela sería de 36 m².

Una vez se terminaron las labores de preparación (picado, rastrillado, y nivelado), se dio comienzo a la inundación de las parcelas. Esta actividad, en cada uno de los tres suelos tomó un total de 72 horas. A partir de este momento se permitió la redistribución de la humedad, con el fin de comenzar los ensayos cuando los contenidos de humedad inicial fueran cercanos a la capacidad de campo.

2.2 Diseño experimental

El diseño experimental corresponde al de bloques completos al azar generalizado; con cuatro tratamientos y ocho repeticiones, los tratamientos utilizados en cada uno de los suelos fueron:

Suelo franco	Suelo franco limo arcilloso	Suelo franco arcilloso
T1 = 2280 cm ³ /h	T1 = 1980 cm ³ /h	T1 = 3600 cm ³ /h
T2 = 4800 cm ³ /h	T2 = 4560 cm ³ /h	T2 = 4800 cm ³ /h
T3 = 9360 cm ³ /h	T3 = 7800 cm ³ /h	T3 = 9360 cm ³ /h

2.3 Suelos

De acuerdo con la caracterización física de los tres suelos utilizados en la investigación, se

determinaron los siguientes parámetros en cada una de las tres parcelas: textura por el método de Bouyoucos, la densidad aparente, por el método del terrón con parafina, la densidad real con el método del picnómetro y, para la determinación de la humedad inicial, la cual se realizó para cada repetición, se empleó el método gravimétrico.

2.4 Infiltración de goteo

Los ensayos se efectuaron siguiendo el procedimiento de Bresler (1970), reemplazando el recipiente (botella de Mariotte) de cien

litros por una fumigadora de espalda de veinte litros de capacidad, con regulador de presión y apropiadamente adaptada para el ensayo de infiltración de goteo colocada a 1,5 m de altura sobre el nivel del suelo. La modificación del recipiente de cien litros fue realizada en la tesis grado "Adaptación de una fumigadora como tanque de presión constante" (Caballero y Correal, 1996). La razón de esta modificación se debe a que los emisores comerciales más empleados en Colombia requieren de presiones mucho más altas que la suministrada por una cabeza de 1,5 m.

Cuadro 1. Parámetros físicos de los suelos utilizados en los ensayos de goteo.

Parámetro	Suelo	Suelo	Suelo
Arena %	43,28	14,28	42,28
Arcilla %	16,72	39,72	18,72
Limo %	40,00	46,00	39,00
Textura	F	FLA	FA
Densidad real	1,75	2,39	1,77
Densidad aparente	0,67	1,24	0,65
Densidad aparente total	1,10	1,63	1,23
Volumen específico	1,49	0,81	1,54
Porosidad	0,62	0,48	0,63
Relación de vacíos	1,61	0,93	1,72
Masa total	35,80	26,67	24,89
Masa de agua	13,00	6,09	9,17
Masa de sólidos	22,80	20,48	15,72
Volumen total	30,40	16,52	24,18
Volumen de agua	13,00	6,09	9,17
Volumen de sólidos	14,52	8,57	8,88
Volumen de aire	6,13	1,86	2,88
Volumen de vacíos	15,30	7,95	15,88
Humedad gravimétrica	0,58	0,29	0,57
Humedad volumétrica	0,37	0,36	0,42
Grado de saturación	0,59	0,23	0,81
Porosidad aireada	0,25	0,11	0,09

Figura 1. Tipo de parcelas utilizadas para realizar los ensayos de infiltración.



Para la realización de los ensayos se dispuso de tres goteros del tipo autocompensado (con el fin de que las variaciones en la presión no incidieran en el caudal aplicado), con caudales nominales de 2,4 y 8 litros por hora. Una vez el suelo fue preparado (picado, rastreado y nivelado) como se hace normalmente para la siembra, se procedió a inundar las parcelas con el fin de tener una humedad cercana a la saturación. Tres días después de la inundación, una vez se alcanzó la humedad inicial próxima a la capacidad de campo, se procedió a realizar los ensayos de Infiltración de goteo.

La presión utilizada para operar los goteros varió entre 15 y 20 psi., razón por la cual los caudales aplicados en los tres suelos

fueron diferentes. Una vez la fumigadora se carga con la presión correspondiente, el regulador es ajustado a la y presión de trabajo de los goteros y la manguera es anclada al suelo con el fin de mantenerla en el mismo sitio y poder efectuar los registros de los diámetros del charco y del frente húmedo producidos por la infiltración de goteo (figura 2).

Las dimensiones de los diámetros de las dos zonas se registraron al primer minuto y de ahí en adelante, cada cinco minutos hasta agotar el contenido de la fumigadora, lo cual ocurrió a los 75 minutos. Las zonas de inundación y de humedecimiento no siempre presentan formas simétricas, por esta razón, se registraron cuatro mediciones del diámetro longitudinal en diferentes direcciones.

Figura 2. Diámetros de las zonas de inundación y del frente húmedo.



En la figura 2, se muestran las dos zonas que se forman durante la infiltración de goteo. El diámetro de cada zona se estableció con el promedio de las cuatro dimensiones registradas.

2.5 Modelo de Bresler y Dasberg

El modelo de Bresler y Dasberg, mediante el cual se estima la conductividad hidráulica saturada K_s cm/h y el parámetro a : cm⁻¹, obtenidos mediante la regresión de los valores q y l/r_{ch} registrados durante la infiltración de goteo, donde K_s corresponde al intercepto de la línea de regresión y a se obtiene mediante la ecuación:

$$\alpha = \frac{4K_s}{\pi b} \quad (16)$$

Donde:

a = parámetro del suelo

K_s = conductividad hidráulica saturada de la superficie del suelo

b = pendiente de la línea de regresión

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos durante la investigación comprenden: A) la descripción del desarrollo de las zonas de inundación y humedecimiento; e) análisis del comportamiento de la infiltración de goteo con el contenido de la humedad inicial del suelo y f) la determinación de los valores de predicción de los diámetros de las zonas de inundación y humedecimiento.

3.1 Descripción del desarrollo de las zonas de inundación y humedecimiento

Como se puede apreciar en la figura 2, durante la realización del ensayo infiltración de goteo se conforman dos zonas perfectamente diferenciadas: 1) la zona de inundación, que corresponde al charco por donde penetra el agua hacia el interior del suelo y 2) la zona de humedecimiento frente de humedecimiento

L_{fh} que corresponde a una corona conformada alrededor de la zona de inundación y cuya longitud se reporta como L_{fh} ; las dos zonas son determinadas por el caudal aplicado y la textura del suelo.

La zona de inundación presentó siempre una conformación asimétrica debido a varias causas, entre las cuales se pueden mencionar el microrelieve del sitio donde está ubicado el gotero y que, definitivamente, determina la forma de la zona; el otro factor que puede ser controlado es la orientación del emisor, la cual debe ser completamente vertical; de lo contrario, el impulso con que sale el agua orientará el desarrollo de las áreas de inundación y humedecimiento en el sentido en que se encuentre orientado el emisor (gotero).

El área del charco varía en proporción directa con el caudal aplicado así: con caudales mayores, se obtienen mayores áreas de inundación. Sin embargo, la influencia del caudal está determinada por la textura del suelo y, más exactamente, por la proporción de la fracción arenosa, como se muestra en el cuadro 2.

Como se puede apreciar, en los valores del diámetro de la zona del charco **Fch** y la longitud del frente de humedecimiento L_{fh} , consignados en el cuadro 2, para contenidos bajos de arcilla, el diámetro del charco es mínimo. Para un contenido de arcilla del 16,5%, con un caudal de 2280 cm³/h, el **Fch** fue el menor de los obtenidos en los diferentes ensayos, con una longitud de 10,7 cm.

Todo lo contrario ocurre con la longitud del frente de humedecimiento L_{fh} , pues las bajas velocidades permitidas por las fracciones finas no admiten un mayor desarrollo de esta zona de humedecimiento, la cual posee una forma simétrica determinada por las propiedades físicas del suelo que, para áreas relativamente pequeñas, es homogénea en todas las direcciones y da origen a dicha simetría; esto se confirma con los valores promedio obtenidos en los ensayos realizados y que se consignan en el cuadro 2, donde los valores de la longitud del frente de humedecimiento son mayores para los suelos con fracciones arcillosas menores.

Cuadro 2. Valores promedio del diámetro de la zona de inundación y de la longitud de la zona de humedecimiento, obtenidos con diferentes caudales y texturas de los suelos analizados

Caudal cm ³ /h	F _{ch} cm.	L _{fh} cm.	Arcilla %	Arena %	Limo %	Suelo (tipo)
2280	10,7	22,6	16,5	42,6	41,3	F
1980	12,4	19,7	36,4	15,6	48,0	FLA
3600	27,6	12,4	39,7	35,6	21,3	FA
4800	16,0	25,8	16,5	42,6	41,3	F
4560	20,9	21,5	36,4	15,6	48,0	FLA
4800	33,4	17,5	39,7	35,6	21,3	FA
9360	24,4	30,2	16,5	42,6	41,3	F
7800	28,3	25,4	36,4	15,6	48,0	FLA
9360	51,5	12,7	39,7	35,6	21,3	FA

F_{ch} = valor promedio del diámetro de la zona de inundación obtenido en las tres parcelas

L = D_{fh} – D_{ch}. Es el valor promedio de la longitud de la zona de humedecimiento obtenido en las tres parcelas.

Caudal = caudal aplicado por un emisor

FLA = suelo franco limo arcilloso

FA = suelo franco arcilloso

F = suelo franco

Observando los resultados obtenidos en cada parcela con cada caudal en todos los suelos de la investigación es de anotar que el mayor F_{ch} obtenido en un ensayo individual correspondió al suelo franco arcilloso, con una longitud de 101 cm, el cual produjo una zona de humedecimiento de 19 cm.

Para los tiempos en que se realizaron los registros, se encontró que todas las zonas de inundación en el primer minuto habían conformado el 30% del área total y, al minuto 5, este porcentaje del valor final fue del 45%. El incremento en las otras lecturas hechas cada cinco minutos fue del 6% y así, para suelo franco, con un contenido de arcilla de 16,5 cm, el F_{ch} fue de 10,7 cm, la longitud

de la zona de humedecimiento fue de 22,6 cm, mientras que, para el suelo Franco Arcilloso con un contenido de arcilla del 37,7 %, el F_{ch} fue de 51,5 cm, y la longitud del frente de humedecimiento, de 12,7 cm. Otra característica de la zona de inundación (charco) constante, en prácticamente la totalidad de los ensayos realizados, es la altura del charco, la cual fue de 3 mm.

Los datos consignados en el cuadro 2 permitieron relacionar también el caudal aplicado con las diferentes fracciones de arena, limo y arcilla de los suelos estudiados, con el fin de obtener el valor estimado del diámetro de la zona de inundación (charco) producida por la zona de infiltración de goteo.

Otro valor determinado a partir de los registros de los ensayos de la infiltración de goteo fue el de la relación F_{ch} / F_{fh} y los valores obtenidos en cada ensayo se presentan en la gráfica 3, donde F_{ch} corresponde al valor final registrado en cada ensayo y F_{fh} al diámetro de la zona de humedecimiento final, incluyendo la zona del charco ya desaparecida al concluir el ensayo. El valor predominante de dicha relación para la mayoría de ensayos fue de 0,4.

4.2 Aplicación del modelo de Bresler y Dasberg a la infiltración de goteo

El modelo de Bresler y Dasberg es el único modelo de los aplicados en la presente investigación que aparece reportado en la literatura como específico para la infiltración de goteo. En la regresión de tipo lineal, el modelo utiliza los valores de la tasa de infiltración y el inverso del radio de la zona de inundación (r^{-1}); por esta razón, y como ya se advirtió al considerar el modelo de Philip en goteo, el hecho de aproximar la zona asimétrica del charco a un círculo tiene una gran influencia sobre los valores del coeficiente de correlación y, en el caso de este modelo, interviene tanto en la determinación de la variable independiente (r^{-1}), como en la dependiente (q). Al realizar, también, la regresión de estas dos variables q y r^{-1} , se encontró que el tiempo al cual se iniciaron las mediciones y los intervalos a los cuales se realizaron éstas tienen también una marcada influencia sobre los valores del intercepto y la pendiente de la línea de regresión.

Con el fin de suprimir esta influencia, las regresiones se efectuaron a partir del minuto 5 y se consideró que la última lectura (minuto 75) permanecía constante en el tiempo.

Con estas observaciones, se aplicó el modelo de Bresler y Dasberg a los registros de goteo en las cuales se pueden apreciar las rectas de regresión obtenidas mediante la aplicación del modelo a cada uno de los ensayos, resaltando que, en cada grupo de ensayos, se puede apreciar, aproximadamente, la misma tendencia, afectada, sólo, por la variabilidad del suelo y las aproximaciones de la zona asimétrica a un círculo. Este hecho se refleja en los valores del coeficiente de correlación, los cuales se pueden considerar aceptables, pues, para el suelo franco, fueron en promedio de 0,77, 0,74, para el franco limo arcilloso y 0,73 para el franco arcilloso.

Con estos valores del coeficiente de correlación y observando las curvas producidas con el modelo se observa que éste ajusta, de

manera más que aceptable, a los registros de la infiltración para goteo.

4.3 Diámetros húmedos

El principal objetivo de la infiltración de goteo es determinar las dimensiones del volumen producido por el agua al entrar y ocupar los espacios porosos del suelo, como resultado de la infiltración producida por los distintos caudales en la aplicación del agua.

En la presente investigación no se determinó la forma y dimensiones del humedecimiento dentro del suelo, pues, como se introdujo el contenido inicial de humedad del suelo como otra variable en la determinación de la infiltración, la humedad del suelo no permitió diferenciar (visualmente) la zona de infiltración de las otras regiones del suelo. Sin embargo, la influencia del contenido inicial de humedad del suelo se pudo determinar a partir de las dos zonas (diámetros de la zona de inundación y de humedecimiento) que se conforman superficialmente durante la infiltración.

El análisis de varianza de bloques completos al azar generalizados (B.C.A.G) de los resultados obtenidos para los valores del diámetro de las zonas de inundación (charco) y de humedecimiento muestran que el desarrollo del diámetro del charco depende del caudal aplicado, de la textura del suelo (% de la fracción arcillosa) y del contenido de humedad del suelo.

Para los valores del diámetro de la zona de humedecimiento se encontró que sí están influidos por el contenido inicial de humedad del suelo, aumentando el valor de los diámetros de esta zona a medida que la humedad del suelo disminuye, probablemente, a causa de la influencia del potencial mátrico. La relación de los diámetros de las dos zonas fue constante e igual para los suelos franco y franco limo arcilloso, con un valor de 0,4; para el suelo franco arcilloso la relación en las tres parcelas con los caudales empleados fue mayor, con un valor de 0,7.

Cuadro 3. Análisis de varianza para los valores del Dch

Suelo	Parcela	F de V	GL	SC	CM	F	Dch (cm)	CV %
F	I	Bloques	7	22,1	3,2	4,7	T1 = 8,5	51,6
		Caudal	2	4,6	2,3	3,4	T2 = 16,71	16,7
		Error	14	9,4	0,7		T3 = 28,85	28,9
	II	Bloques	7	3,9	0,6	1,4	T1 = 11,5	27,6
		Caudal	2	7,0	3,5	8,5	T2 = 17,6	9,8
		Error	14	5,7	0,4		T3 = 23,1	45,3
	III	Bloques	7	7,1	1,0	1,2	T1 = 10,6	47,2
		Caudal	2	8,2	4,1	4,9	T2 = 14,9	69,0
		Error	14	11,8	0,8		T3 = 21,9	36,2
FLA	I	Bloques	7	12,7	1,8	3,1	T1 = 11,81	12,9
		Caudal	2	1,9	1,0	1,6	T2 = 23,6	32,3
		Error	14	8,2	0,6		T3 = 26,55	33,4
	II	Bloques	7	16,1	2,3	9,5	T1 = 13,93	23,3
		Caudal	2	6,7	3,3	13,8	T2 = 20,4	41,0
		Error	14	3,4			T3 = 33,2	27,8
	III	Bloques	7	10,4	1,5	5,4	T1 = 11,64	33,3
		Caudal	2	12,5	6,3	22,7	T2 = 18,73	49,2
		Error	14	3,9	0,3		T3 = 25,85	35,9
FA	I	Bloques	3	7,1	2,4	2,1	T1 = 20,08	40,0
		Caudal	2	15,6	7,8	6,8	T2 = 39,8	39,8
		Error	6	6,9	1,1		T3 = 53,63	53,6
	II	Bloques	3	3,9	1,3	1,1	T1 = 30,13	45,7
		Caudal	2	5,9	2,9	2,6	T2 = 33,08	34,4
		Error	6	6,7	1,1		T3 = 49,88	30,5
	III	Bloques	3	3,5	1,2	1,3	T1 = 32,5	49,0
		Caudal	2	5,5	2,8	3,1	T2 = 34,83	28,0
		Error	6	5,4	0,9		T3 = 58,5	27,7

CONCLUSIONES

La determinación de los diámetros húmedos para el diseño de riego por goteo, bajo las características y condiciones del estudio, permite establecer las siguientes conclusiones:

En todos los casos, la conformación del 80% de las zonas de inundación y humedecimiento ocurre durante los primeros 10 minutos del ensayo.

La longitud final del diámetro del frente de humedecimiento depende, principalmente, de la fracción de arena presente en el suelo, del caudal y el volumen aplicado.

La relación del área del charco con el área de humedecimiento disminuye a medida que aumenta el porcentaje de la fracción arenosa del suelo. La forma del área del charco, siempre, es asimétrica y la dificultad de su medición introduce una imprecisión que tiene un mayor efecto sobre el modelo de Bresler y Dasberg.

Dependiendo del modelo y el método empleados para determinar el valor de K_s , el valor del diámetro húmedo varía para el suelo franco de 0,6 a 0,9 (q)^{0.5}, para el suelo franco limo arcilloso, de 0,7 a 0,9 (q)^{0.5} y para el suelo franco arcilloso de 0,8 a 0,9 (q)^{0.5}.

BIBLIOGRAFÍA

- Caballero, C., Correal, J. y Campos, A., "Adaptación de una fumigadora como tanque de presión constante" [trabajo de grado], Bogotá, Universidad Nacional, Carrera de Ingeniería Agronómica, 1995, pp. 75-94.
- Chang, W., Hils, D., "Sprinkler droplet effects on infiltration", en *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, U.S.A. 119, 1995, pp. 42-69.
- Clothier, B., Green, S., Katou, H., "Multidimensional infiltration: points, furrows, basins, wells and disk", en *Soil Science Society of America*, U.S.A. 59 (2), pp. 286-292, 1992.
- Dasberg, S., y Bresler, E., *Drip Irrigation Manual*, Volcani Center, ILIC Publication, 1985, pp. 85-150.
- Dickinson, W., Elrick, W., "Modeling Spatial Patterns of three Infiltration parameters", en *Canadian Agricultural Engineering Yearbook*, núm. 36, 1994, pp. 9-13.
- Goldberg, D., Gornaty, B., Rimont, D., *Drip Irrigation*, Kfar Shmaryahu (Israel), s.e., 1976.
- Juri, A., Gardner, W., *Soil Physics*, New York, John Wiley and Sons Inc, 1991.
- Kutilek, M., Nielsen, D., *Soil Hidrology*, Cremlingem, Catena Verlag, 1994.
- Moya F., *Riego localizado y fertirrigación*, Madrid, Mundi-Prensa, 1994.
- Philip, J., *The physical principles of soil water movement during the Irrigation cycle. International Congress on Irrigation and Drainage*, New York, Proc. 3rd (8), 1957, pp. 125-154.
- Quintero, J., *Hidráulica de pozos*, Bogotá, Insfo-pal 1974, pp. 20-45.
- Shani, U. et al., "Field method for estimating hydraulic conductivity and matric potential water content relations", en *Soil Science Society Journal*, núm. 51, 1987, pp. 298-302.
- Steel, R., y Torrie, J., *Bioestadística. Principios y procedimientos*, New York, Mc Graw-Hill, 1985, pp. 145-200.